ARAŞTIRMA MAKALESİ

Sabit Hava Debili ve Değişken Hava Debili İklimlendirme Sistemlerinin Ekonomik Analizi

Özlem EMANET
Dr. Mak. Müh.
Yıldız Teknik Üniversitesi
Makine Fakültesi
Makine Mühendisliği
İstanbul
panzehir@yildiz.edu.tr
orcid: 0000-0002-1947-7699

Nuri Alpay KÜREKCİ
Doç. Dr.
Yıldız Teknik Üniversitesi
Makine Fakültesi
Makine Mühendisliği
İstanbul
kurekci@yildiz.edu.tr
orcid: 0000-0002-0450-4818

ÖZ

İşletmenin büyüklüğü, kullanım amacı, bulunduğu iklim koşulları, soğutma sisteminin seçiminde temel kriterlerdir. Bir işletmenin ısı kayıp ve kazanç hesapları yapıldıktan sonra sistem seçiminde yapılacak hatalar, işletmenin ömrü boyunca yüksek enerji maliyetleri ile karşılaşmasına neden olabilmektedir. Enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karbon kökenli yakıtlardan temin eden ve bu yakıtları da ithal eden ülkemizde, yapılacak bu tür hatalar önemli bir gider kalemi oluşturmaktadır. Çalışmada örnek bir bina için kullanılması ihtimal dahilinde olan sabit hava debili ve değişken hava debili iki sistem ekonomik olarak karşılaştırılmıştır. Binanın yıllık enerji ihtiyacı HAP (Hourly Analysis Program) ile hesaplanmış, seçilecek ekipmanlar ve enerji tüketimleri göz önüne alınarak ve Bugünkü Değerlendirme Metodu kullanılarak amortisman süreleri hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler

CAV-VAV Sistem Karşılaştırması, HAP, Enerji Tasarrufu.

Economic Analysis of Constant and Variable Air Flow Systems

ABSTRACT

The size of the enterprise, the purpose of use, and the climatic conditions change the cooling system to be chosen. Errors to be made in the system selection after the heat loss and gain calculations of an enterprise may cause the enterprise to encounter high energy costs throughout its life. In our country, which supplies most of its energy needs from carbon-based fuels and imports these fuels, such mistakes constitute an important expense item. In the study, two systems with constant air flow and variable air flow for a sample building, were compared economically. The annual energy need of the building was calculated with the HAP (Hourly Analysis Program), and the amortization periods were calculated by using Today's Evaluation Method, taking into account the equipment and energy consumption to be selected.

Keywords

CAV-VAV System Comparison, HAP, Energy Savings.

Geliş Tarihi : 26.09.2023
Kabul Tarihi : 10.10.2023

Emanet, Ö., Kürekci, N. A., Sabit Hava Debili ve Değişken Hava Debili İklimlendirme Sistemlerinin Ekonomik Analizi, Tesisat Mühendisliği Dergisi, sayı: 198, sf. 1-10, Eylül-Ekim 2023.

1. GİRİŞ

Binaları projelendiren mekanik tasarımcılar en ekonomik ve en mükemmel sistemi seçmek isterler. Bu nedenle bina projelerinde bir takım seçim kriterlerini göz önüne alarak çeşitli tercihlerde bulunurlar. Seçilecek iklimlendirme sisteminin belirlenmesinde, istenen iklimsel konfor kriterlerinin rolü çok önemlidir.

Ülkemizde ekonomik koşullardan dolayı kentlerde yaşayan insan sayısı artmış, köy ve küçük kasabalarda yaşayan insan sayısı azalmıştır. Bu durum büyük şehirlerin insan yükünü artırmış ve bir çok şehirde trafik, hava kirliliği vb. problemleri beraberinde getirmiştir. İnsanların dar alanlara sıkışması, çözüm olarak yüksek katlı binaların yapılması, bu tür binalarda yüksek enerji tüketimi ve bunun doğurduğu çevre kirliliği, bu şekilde yaşamayı tercih eden insanların karşılaştığı problemlerden bir kaçını oluşturmaktadır. Üstelik bu tür binalarda yaşayan insanlar, yaşadıkları çevre kirliliği nedeniyle bulundukları ortamlarda doğal havalandırma ile iç hava kalitesini artıramamaktadır. Bu da havanın filtre edildiği ve şartlandırıldığı HVAC (Heating Ventilating and Air Conditioning) sistemlerini zorunlu kılmaktadır.

HVAC sistemleri çalışma ilkelerine göre: 1. Çok veya tek üniteli bireysel paket sistemler, 2. Tüm havalı sistemler, 3. Havalı-sulu sistemler ve 4. Sulu sistemler olmak üzere dört farklı şekilde olabilmektedir [1].

Bahsi geçen tüm sistemlerle hava şartlandırılması yapılabilir. Fakat binanın kullanım şekli, kullanım amacı, iklim koşulları, işletim şekli ve harcanan enerji miktarı gibi değişkenler göz önüne alındığında bu sistemlerin birisi öne çıkmaktadır. Projesi yapılan binanın işletmesine en uygun sistem ve bu sisteme de en uygun sistem bileşenleri seçilmelidir [2]. En uygun sistemi seçebilmek için farklı programlar kullanarak karşılaştırma yapılmalıdır [3]. Ayrıca makalelerde sistemlerin simülasyonları için yapılmış benzer çalışmalar dikkatli incelenmelidir [4].

Konfor şartlarının sağlanmasındaki başarı, sistemlerde kullanılan kontrol yöntemine bağlıdır. Sistemlerde farklı kontrol mekanizmaları kullanarak istenen konfor şartları sağlanabilmekte ve konfor şartları sağlanırken de enerji tüketim değerleri değişmektedir [5]. Etkin enerji yönetimi uygulaması, bu sistemlerin enerji tüketiminde kullanım amacına bağlı olarak %10 ile %30 arasında azalma meydana getirebilmektedir [6].

Bilgisayar programları ile seçilecek sistemlerin konfor şartlarını sağlamadaki başarısı, bunun için tüketilen enerji miktarının tespiti, sistemde ölçüm yapmadan belirlenebilmektedir. Hatta yapılan çözümlemeler ile ölçümler arasında hata payının az olduğuna dair çalışmalar da bulunmaktadır [7].

Bu konuyla ilgili yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Tukur vd. (2017), yaptıkları çalışmada statik basıncı sıfırlamadan, enerji tasarrufunu tahmin etmek için istatistiksel bir model önermişlerdir. Ölçülen kanal statik basıncı, VAV hava akışları ve ortalama VAV damper konumunun bir fonksiyonu olarak, etkin sistem kaybı katsayısı arasında istatistiksel bir ilişki kurmuşlardır. Belirli bir statik basınç koşulunda kontrol hassasiyetini sağlamak için, bina otomasyon sistem verileri kullanarak açılabilecek maksimum damper sayısını belirlemişlerdir. Amaç, her zaman maksimum sayıda damperin açılmasını sağlamaktır. İleride yapılacak tasarruf miktarını bulabilmek için, optimum statik basınca dayalı olarak tahmin edilen fan gücünü, gerçek fan gücüyle karşılaştırmışlardır [8].

Aktacir vd. (2006), sabit hava debili (CAV) ve değişken hava debili (VAV) iklimlendirme sistemlerinin ekonomik fizibilitelerini değerlendirmek için, ayrıntılı yük profilleri ve başlangıç ve işletme maliyetlerini kullanan bir yaşam döngüsü maliyet analizi yapmışlardır. Adana ilinde bulunan CAV veya VAV sistemleri ile şartlandırılabilen, iki farklı kullanımı olan (okul ve ofis) bir bina için yaşam döngüsü maliyet analizi ve bugünkü değer maliyet yöntemi uygulamışlardır. Değerlendirilen tüm durumlar için, VAV sisteminin ilk maliyetinin CAV sisteminden daha yüksek olmasına rağmen, daha düşük fan işletim maliyetleri nedeniyle kullanım ömrü sonunda, VAV sisteminin bugünkü maliyetinin CAV sistemininkinden daha düşük olduğunu bulmuşlardır [9].

Bakry vd. (2022), Norveç'te Viking Çağı Müzesi'nde tarihi eserlerin bulunduğu alanların şartlandırılması için simülasyon yaparak enerji tasarruf potansiyelini tespit etmişlerdir. Termal performans ve enerji tüketimini değerlendirmek için IDA-ICE bina simülasyon aracı, sergi nesne-

leri için ASHRAE gereksinimlerine uygun olarak iç mekan sıcaklık ve bağıl nem dağılımını değerlendirmek için ANSYS-FLUENT yazılımı kullanmışlardır [10].

Yao vd. (2007), Çin'in farklı iklim bölgeleri için 6 şehir seçmiş, VAV sistemlerin enerji tasarrufu oranını, sabit hava hacimli sistemler ve fan-coil sistemleriyle karşılaştırmışlardır. Çalışmada küçük bir ofis binasını örnek almışlar, aynı binanın üç çeşit HVAC sisteminin (VAV, CAV ve fan-coil sistemi) yıl boyunca enerji simülasyonlarını yapmışlardır [11].

Fasiuddin vd. (2011), yaptıkları çalışmada Visual-DOE programı kullanarak enerji tüketimini etkileyen farklı HVAC sistemleri için ana tasarım ve işletme değişkenlerini araştırmışlardır. Sonuçta, HVAC sistemleri uygun şekilde seçildiğinde ve çalıştırıldığında (kabul edilebilir bir ısıl konfor seviyesi korunurken), %30'a varan enerji tasarrufunun elde edilebileceğini bulmuşlardır [12].

Mevcut kaynaklar incelendiğinde, VAV sistemi ile CAV sisteminin enerji tüketimi konusunda yeterli çalışmanın yapılmadığı, yapılan çalışmalarda da HAP programı kullanılmadığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada, HAP programı ile çok amaçlı örnek bir binanın CAV ve VAV sistemlerinin kullanılması durumunda harcayacağı enerji miktarları bulunarak, VAV sisteminin ilk yatırım maliyeti, bakım giderleri gibi sistemin seçilmesi durumunda harcanacak gider kalemleri de göz önüne alarak amortisman hesabı yapılmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Seçilen Bina Özellikleri

Çalışmada İstanbul'da bulunan ve çok amaçlı kullanım özelliği olan bir bina seçilmiştir. Seçilen binanın mimari projesi Şekil 1'de görülmektedir.

İşletmede 1 adet kafeterya, 1 adet bar, 1 adet oturma salonu, 1 adet kafe, 3 adet yönetim odası, 1 adet depo, 1 adet mahal girişi ve koridor, 1 adet makine dairesi ve 1 adet bilgisayar odası bulunmaktadır. Mahal kat yüksekliği 4 m'dir. Seçilen mahalin yönlere göre dış duvar ve pencere alanları Tablo 1'de verilmiştir. Binanın etrafında komşu ortam bulunmamaktadır. Binanın altı toprak dolgu, çatı ise kullanılmayan beşik çatıdır.



Şekil 1. Hesaplamalarda kullanılan binanın mimari projesi

Tablo 1. Mahalin Yönlere Göre Dış Duvar ve Pencere Alanları

Yönler	Duvar Alanı (m^2)	Pencere Alanı (m^2)
Kuzey	239,4	129,6
Batı	114,72	73,84
Güney	17,2	316,4
Doğu	123	36

Kafeterya bölümü 327,6 m^2 alanı, 120 müşteri ve 30 çalışan insan kapasitesine sahiptir. Kafeteryanın mutfak kısmında elektrikli ocak ve fırın bulunmaktadır.

Bar ve oturma salonunda 150 müşteri ve 20 çalışan insan bulunmaktadır. Toplam alanı 643,6 m^2'dir.

Kafe bölümü 581,6 m^2 alana sahip, içinde 1 adet mutfak ve lavabonun bulunduğu bir mahaldir. Mahalde 150 müşteri, 20 çalışan insan bulunmaktadır.

Depo ise aktif kullanılan bir mahal olmayıp, evrak saklama alanı olarak kullanılmaktadır. Penceresi olmayan bir mahal olup, toplam 34,79 m^2 bir alana sahiptir.

Yönetim odaları ise birbirlerine bitişik 3 odadan oluşmakta, 10 adet personelin bulunduğu ve toplam alanı 107,9 m^2 olan bir mahaldir.

2.2. Hesaplar

Mahallerin ısı kayıp ve kazançları Hourly Analiysis Programı (HAP) ile hesaplanmıştır. Hesaplarda il olarak İstanbul seçilmiş, programın veri tabanındaki meteorolojik veriler kullanılmıştır. İnsan, aydınlatma ve elektriksel cihaz yüklerinin program tarafından hesaplanması için işletmenin çalışma koşullarına uygun bir iş programı oluşturulmuştur. Hafta içi öğle ve akşamları, hafta sonu ise daha çok akşamları yoğunluk olacağı düşünülmüştür. İş programları yılın tüm ayları için aynı olacak şekilde seçilmiştir.

Dış duvar malzemesi, 13 mm iç sıva, 203 mm tuğla, 25 mm yalıtım malzemesi ve 25 mm dış sıvadan oluştuğu programa girilmiştir.

Dış duvar üzerindeki pencereler ise 3 mm çift cam arasında 6 mm hava boşluğu bulunan ve toplam ısı geçiş katsayısı 3,237 W/m^2K olan pencereler seçilmiştir. Pencerelerde kullanılan camların, %7,8 yansıtma, %84,1 geçirme ve %8,1 yutma özelliğinde olduğu kabul edilmiştir.

Mekan giriş kapısı döner tip olup, kapı doğrama kısmının toplam ısı geçiş katsayısı 1,01 W/m^2K, cam kısmının ise 3,237 W/m^2K olarak programa girilmiştir.

Kafeterya iç yüklerinin hesabında: her biri 36 W olan toplam 15 adet aydınlatma armatürü, "Aydınlatma" iş programı ile seçilmiştir. Ayrıca kafeterya bölümünde 2 adet buzdolabı (291 W/adet), 4 adet tost makinesi (210 W/adet), 3 adet çaydanlık (186 W/adet) ve 1 adet elektrikli fırın (1455 W/adet) olduğu düşünülerek toplam 3435 W ısı yükü daha önceden seçilmiş "Elektriksel Cihazlar" iş programı ile tanımlanmıştır. İnsanlar için ise 70 W/kişi duyulur ısı, 62 W/kişi gizli ısı alınarak, iş programı olarak da "İnsan" iş programı seçilmiştir.

Bar ve oturma salonunun iç yüklerinin hesabında: asılı aydınlatma tiplerinden toplamda 340 W, her biri 20 W olan toplam 5 adet özel aydınlatma armatürü toplamda 100 W olarak ve de "Aydınlatma" iş programı ile seçilmiştir. Ayrıca bar ve oturma salonu bölümünde 2 adet buzdolabı (291 W/adet), toplam 582 W ısı yükü "Elektriksel Cihazlar" iş programı ile tanımlanmıştır. İnsanlar için ise 67,4 W/kişi duyulur ısı, 35,2 W/kişi gizli ısı alınarak, "İnsan" iş programı seçilmiştir.

Kafe bölümünün iç yüklerinin hesabında: asılı aydınlatma tiplerinden toplamda 540 W, her biri 30 W olan toplam 5 adet toplamda 150 W özel aydınlatma armatürü "Aydınlatma" iş programı ile seçilmiştir. Ayrıca kafe bölümünde 2 adet buzdolabı (291 W/adet), 2 adet tost makinesi (210 W/adet), 4 adet elektrik ocağı (116 W/adet) ve 2 adet elektrikli fırın (1455 W/adet) olduğu toplam 4376 W ısı yükü "Elektriksel Cihazlar" iş programı ile tanımlanmıştır. İnsanlar için ise 67,4 W/kişi duyulur ısı, 35,2 W/kişi gizli ısı alınarak, "İnsan" iş programı seçilmiştir.

Yönetim büro bölümünün iç yüklerinin hesabında: her odada gömülü ve havalandırma boşluğu olmayan 36 W gücünde aydınlatma armatürü ve "Aydınlatma" iş programı seçilmiştir. Bu bölümde özel aydınlatma bulunmamaktadır. Ayrıca yönetim bürolarında 4 adet bilgisayar (116 W/adet), 2 adet fotokopi makinesi (290 W/adet) olduğu toplam 1044 W tanımlanmış, "Elektriksel Cihazlar" iş programı seçilmiştir. Odalarda 6 kişinin olacağı düşüncesi ile insanlar için ise 71,8 W/kişi duyulur ısı, 60,1 W/kişi gizli ısı alınarak, "İnsan" iş programı seçilmiştir.

Giriş ve koridorların iç yüklerinin hesabında: gömülü ve havalandırma boşluğu olmayan her biri 40 W gücünde 20 adet aydınlatma armatürü ve "Aydınlatma" iş programı seçilmiştir. Bu bölümde toplamda 120 W özel aydınlatma bulunmaktadır. Elektriksel cihaz mevcut değildir. 65 kişinin olabileceği düşüncesi ile insanlar için ise 67,4 W/kişi duyulur ısı, 35,2 W/kişi gizli ısı alınarak, "İnsan" iş programı seçilmiştir.

Depo bölümünün iç yüklerinin hesabında: asılı aydınlatma tiplerinden toplamda 60 W ve "Aydınlatma" iş programı seçilmiştir. Bu bölümde özel aydınlatma bulunmamaktadır. Depo bölümü pasif olarak kullanıldığından herhangi bir elektriksel cihaz mevcut değildir. 1 kişinin olabileceği düşün-

cesi ile insanlar için ise 71,8 W/kişi duyulur ısı, 60,1 W/kişi gizli ısı alınarak, "İnsan" iş programı seçilmiştir.

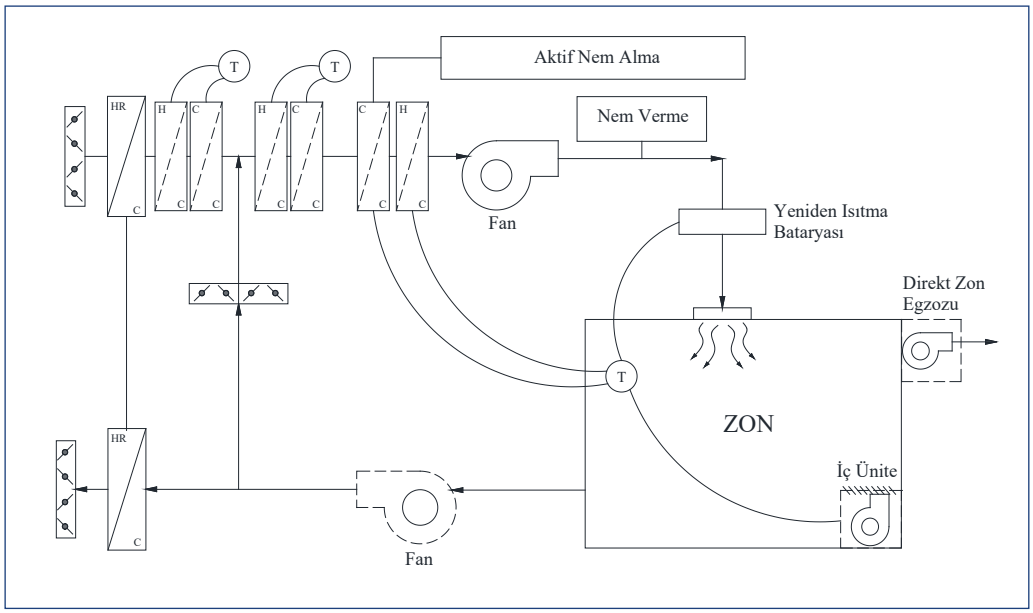
2.3 Sistem Seçimi

HAP programında seçilebilecek birden fazla sistem bulunmaktadır. Bu çalışmada ülkemizde sıklıkla kullanılan CAV (Constant Air Volume) ve VAV (Variable Air Volume) sistemleri seçilerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

CAV sisteminde seçilen hava terminali, sabit bir debide besleme yaparken, ortama gönderilecek hava debisi değişmez. Örnek bir CAV sistem şeması Şekil 2'de verilmiştir. Havanın tamamı dış ortamdan alınabileceği gibi, dönüş havasından karışım da yapılabilmektedir. Özellikle enerji tasarrufu amacıyla yapılan bu karışımın, tüm dünyada yaşanan pandemi nedeniyle sakıncalı olduğu ve karışım yapılan binalarda insanların tam olarak güvende olamadıkları anlaşılmıştır. Dışarıdan alınan hava dönüş havası ile karıştırılmadan bir ısı değiştiriciden geçirildikten sonra, ihtiyaca göre ısıtılıp soğutulduktan sonra fan aracılıyla basınçlandırılarak mahale gönderilmektedir. Mahalde bulunan termostat, klima santrali içindeki ısıtma ve soğutma ısı değiştiricilerin çıkış sıcaklıklarına kumanda edebilmektedir [13].

HAP programında CAV sistemi menüsü içinde seçilen değişkenler: Sistem çalışmadığında damper kapalı ve %5'lik kaçak olduğu varsayılmıştır. İstanbul ili için dış hava CO_2 seviyesi 400 ppm olarak alınmıştır. Sistemde ekonomizer ve ısı geri kazanım cihazı bulunmamaktadır. Mahallere yollanacak havanın maksimum %60 bağıl nem içerecek şekilde ayarlandığı kabul edilmiştir. Sistemde nemlendirici mevcut değildir. Aralık, Ocak ve Şubat aylarında soğutma yapılmamaktadır. Soğutma suyu chillerden temin edilen su (7 °C) ile gerçekleştirilmektedir. İstanbul'un dış hava şartları kuru termometre ve yaş termometre sıcaklığı sırasıyla 34-24 °C'dir. Mahal sıcaklıklarının 24 °C olması planlanmıştır. Bu durumda üfleme sıcaklığı 16 °C olarak seçilmiştir. By-pass faktörü %10 olarak seçilmiştir. Isıtma kazandan temin edilen sıcak su ile sağlanmaktadır. Üfleme sıcaklığı olarak 43 °C seçilmiştir. Mayıs, Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında ısıtma yapılmamaktadır. Kanal basınç kayıpları 1200 Pa ve fan verimliliği %54 olarak seçilmiştir. Sistemde kullanılan hava kanallarında %20 ısı kazancı olacağı ve %5'lik bir kaçak olduğu varsayılmıştır. Bu değerler, genelde bu tür projelerde tasarımcılar tarafından seçilen değerlerdir. Geri dönüş fanı için ileri eğimli, %55 verimli ve 900 Pa basınç kaybını karşılayabilecek kapasitede fan seçilmiştir.

Program vasıtasıyla tüm mahaller tek bir zon olarak tanımlanmış ve hava dağılımı her bir mahalin pik ısıl yüklere göre gerekli havanın hesaplanması şeklinde seçim yapılmıştır. CAV üniteleri mahal-



Şekil 2. CAV sistem şeması

lerdeki asma tavana yerleştirilir ve bir kanal vasıtası ile ana besleme hava kanallarına bağlanır.

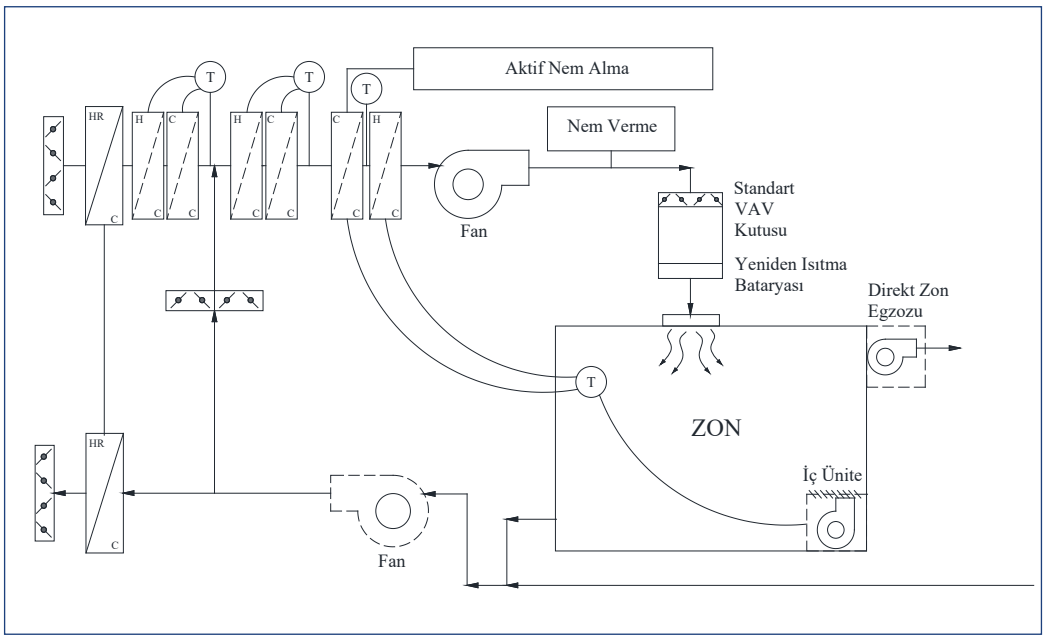
VAV (Variable Air Volume) sisteminde hava debisi değişkendir. Mekânların farklı dönemlerde, farklı ısıtma-soğutma yükleri olmaktadır. Bu sistemde santral çıkışındaki hava debisi sabit olsa bile, odaya verilen hava miktarı zonların girişine konulan VAV kutuları sayesinde değişkenlik gösterir. Bu sistemde en önemli eleman VAV kutusu olmaktadır. Örnek bir VAV sistem şeması Şekil 3'de verilmiştir [14,15].

HAP programında VAV sistemi menüsü içinde seçilen değişkenler: Sistem çalışmadığında damper kapalı ve %5'lik kaçak olduğu varsayılmıştır. İstanbul ili için dış hava CO_2 seviyesi 400 ppm olarak alınmıştır. Sistemde ekonomizer ve ısı geri kazanım cihazı bulunmamaktadır. Mahallere yollanacak havanın bağıl nemi maksimum %60 olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 3'de klasik VAV sistemlerinde nem alma ve nem verme olabildiği gibi seçilen sistemde nemlendirici mevcut değildir. Aralık, Ocak ve Şubat aylarında soğutma yapılmamaktadır. Soğutma suyu chillerden temin edilen su ile gerçekleştirilmektedir. CAV sistemi örneğinde olduğu gibi mahal sıcaklıklarının 24 °C olması planlanmış, üfleme sıcaklığı 14 °C olarak seçilmiştir. By-pass faktörü %10 olarak seçilmiştir. Isıtma, kazandan temin edilen sıcak su (80-60 °C) ile sağlanmaktadır. Üfleme sıcaklığı olarak 43 °C seçilmiştir. Mayıs, Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında ısıtma yapılmamaktadır. Kanal basınç kayıpları 1200 Pa ve fan verimliliği %54 olarak seçilmiştir. Sistemde kullanılan hava kanallarında %10 ısı kazancı olacağı ve %5'lik bir kaçak olduğu varsayılmıştır. Bu değerler genelde bu tür projelerde tasarımcılar tarafından seçilen değerlerdir. Geri dönüş fanı için ileri eğimli, %54 verimli ve 900 Pa basınç kaybını karşılayabilecek kapasitede fan seçilmiştir.

VAV sisteminde mahaller farklı zon olarak seçilmiştir. Her mahal için farklı termostat tanımlanmıştır. Termostat gece 01-05 arasında kapalı, diğer saatlerde açık olarak seçilmiştir. Sistem VAV olduğundan, hava miktarı değişkenlik göstermektedir. Mahaldeki pik yüklere göre hava debisinin zonlar arasında değiştiği metot seçilerek sisteme kaydedilmiştir.

3. BULGULAR ve DEĞERLENDİRME

Havalandırma fanı, chiller, kazan ve pompalar HAP programı tarafından sistemin ihtiyacına göre seçilmektedir. Program tarafından seçilen bu cihazların harcadıkları yıllık elektrik enerjisi miktarı yine program tarafından hesaplanmış ve Tablo 2'de verilmiştir. CAV sistemi için seçilen cihazların dağılımına bakıldığında havalandırma, soğutma ve ısıtma sistemi en çok elektrik enerji-



Şekil 3. VAV sistem şeması

si kullanan kısım olmaktadır. %91,05 oranında iklimlendirme sisteminde, elektrikli cihazlarda (%6,87) ve aydınlatmada (%2,08) olmak üzere toplam %8,95 oranında da iklimlendirme harici sistemlerde enerji kullanılmaktadır. İklimlendirme sisteminde en çok enerji %63,57 oranında fanlarda kullanılmaktadır. Bunu %23,40 ile soğutma sistemi, %3,18 ile ısıtma sistemi ve %0,90 ile pompalar takip etmektedir. Havalandırma fanı 138.257 $, soğutma sistemi 50.889 $, ısıtma sistemi 6.920 $ ve pompa elektrik maliyeti 1.950 $ olarak hesaplanmıştır. Birim alan için harcanacak miktarları da Tablo 2'de verilmiştir. CAV sistemindeki giderlerin yüzdesel değişimleri Şekil 4'de verilmiştir.

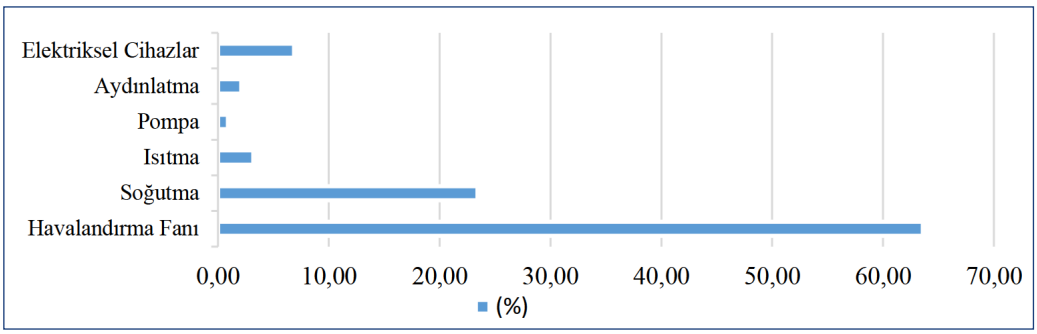
VAV sistemi için seçilen cihazların dağılımı Tablo 3'de verilmiştir. CAV sistemine benzer şekilde havalandırma, soğutma ve ısıtma sistemi en çok elektrik kullanılan kısım olmaktadır. %80,94 oranında iklimlendirme sisteminde, elektriksel cihazlarda (%14,62) ve aydınlatmada (%4,44) olmak üzere toplam %19,06 oranında iklimlendirme haricin sistemlerde enerji kullanılmaktadır. İklimlendirme sisteminde en çok enerji %41,57 ile soğutma sistemi tarafından kullanılmaktadır. Bunu %32,66 ile havalandırma fanları, %6,58 ile ısıtma sistemi ve %0,13 ile pompalar takip etmektedir. VAV sis-

Tablo 2. CAV Sisteminde Elektrik Enerjisi Tüketim Gideri

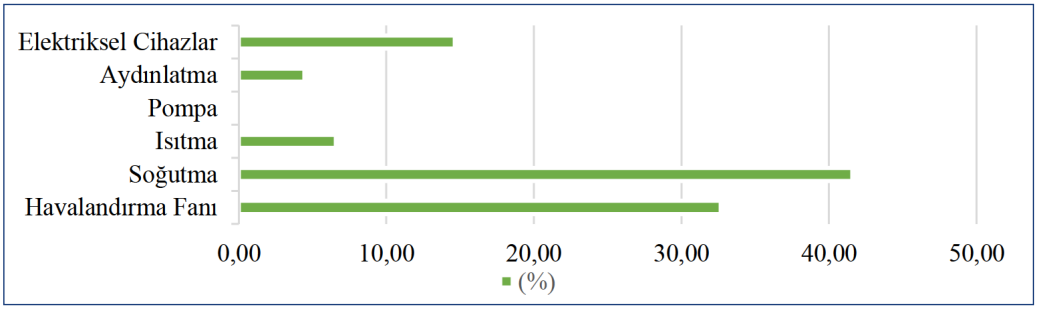
Bileşen	$	%	($/m²)
Havalandırma Fanı	138.257	63,57	50,84
Soğutma	50.889	23,40	18,71
Isıtma	6.921	3,18	2,55
Pompa	1.950	0,90	0,72
HVAC Ara Toplamı	198.017	91,05	72,81
Aydınlatma	4.535	2,09	1,67
Elektriksel Cihazlar	14.933	6,87	5,49
HVAC Harici Ara Toplamı	19.468	8,95	7,16
Toplam	217.486	100,00	79,97

Tablo 3. VAV Sisteminde Elektrik Enerjisi Tüketim Gideri

Bileşen	$	%	($/m²)
Havalandırma Fanı	33.356	32,66	12,27
Soğutma	42.458	41,57	15,61
Isıtma	6.721	6,58	2,47
Pompa	133	0,13	0,05
HVAC Ara Toplamı	82.667	80,94	30,40
Aydınlatma	4.535	4,44	1,67
Elektriksel Cihazlar	14.933	14,62	5,49
HVAC Harici Ara Toplamı	19.468	19,06	7,16
Toplam	102.135	100,00	37,56



Şekil 4. CAV sisteminde enerji giderlerin yüzdesel dağılımı



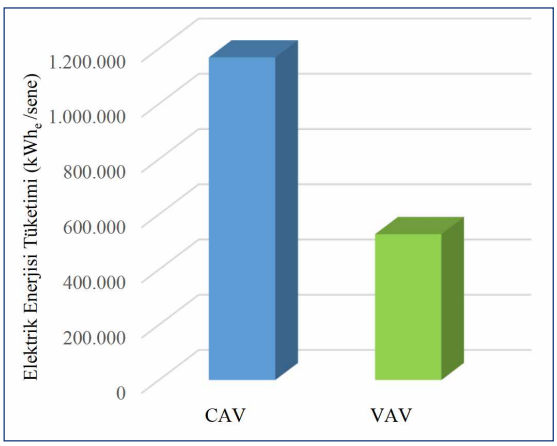
Şekil 5. VAV sisteminde enerji giderlerin yüzdesel dağılımı

teminde soğutma sistemi en yüksek maliyete sahiptir. Soğutma sistemi için 42.458 $, havalandırma fanı için 33.356 $, ısıtma sistemi için 6.721 $, pompa için 133 $ elektrik maliyeti hesaplanmıştır. Birim alan için sistem maliyeti Tablo 3'te gösterilmiştir. VAV sistemindeki giderlerin yüzdesel değişimleri ise Şekil 5'de verilmiştir.

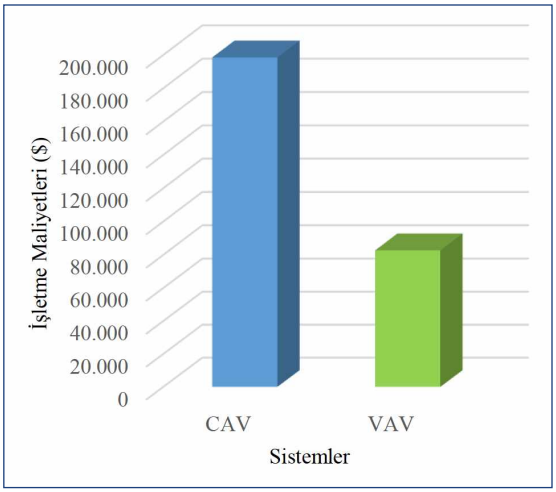
VAV ve CAV sistemlerinde ortak olan ve olmayan ekipmanlar bulunmaktadır. Karşılaştırma yaparken ortak olan ekipmanlar göz ardı edilmiş, ortak olmayan ekipmanların ilk yatırım maliyetine getireceği artış miktarı belirlenmeye çalışılmıştır. Isıtma ve soğutma grubu kapasiteleri birbirlerine çok yakın olduğundan, chiller ve kazanda maliyet artışı olmamaktadır.

VAV sisteminde daha fazla zon oluşturulabilmektedir. Bu da CAV sistemine göre daha fazla kanal, anemostat ve menfez anlamına gelmektedir. Tablo 4'de VAV sistemi kullanılması durumunda, CAV sistemine göre daha fazla kullanılacak malzemeler ve bunların maliyetleri verilmiştir. CAV yerine VAV sistemi kullanılması durumunda toplam 140.000 $ maliyet artışı olmaktadır.

Fakat VAV sisteminde tüketilen elektrik enerjisi, CAV sistemine daha azdır. VAV sisteminde yıllık 528.205 kWhe enerji tüketimi gerçekleşirken, CAV sisteminde VAV'a göre %121 daha fazla olmakta ve 1.168.172 kWhe değerine ulaşmaktadır (Şekil 6). Bu durum işletme maliyetlerinin de değişmesine neden olmaktadır. CAV sisteminin havalandırma fanı, soğutma, ısıtma, pompa ve soğutma kulesinde harcanan yıllık enerji giderinin karşılığı 198.469 $ olurken, VAV sisteminde aynı kalemler için toplamda 82.667 $ harcanmaktadır (Şekil 7).



Şekil 6. CAV ve VAV sistemlerin elektrik enerjisi tüketimleri



Şekil 7. CAV ve VAV sistemindeki işletme maliyet karşılaştırması

Tablo 4. VAV Sisteminin CAV Sistemine Göre İlk Yatırım Maliyet Farkları

Ekipman	Maliyet ($)
Havalandırma Kanalı	27.777,78
Anemostat	6.666,67
Menfez+Panjur	3.333,33
İzolasyon	16.666,67
Flex Kanal	1.388,89
VAV Box	83.333,33
İlave Isıtma Serpantini	833,33
Toplam	140.000,00

4. SONUÇLAR

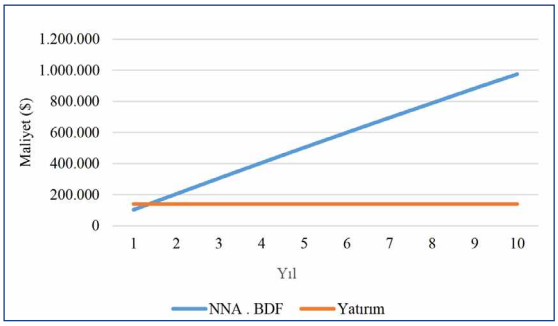
Kafeterya, bar, oturma salonu, kafe, depo ve yönetim odalarından oluşmuş bir yapının, CAV sistemi ve VAV sistemi ile şartlandırılması durumunda ilave ekipman ve enerji giderleri karşılaştırılmıştır. Hesaplarda HAP programı kullanılarak her iki sistem için harcanan elektrik enerji miktarları bulunmuştur. Hesaplama programı yardımıyla bulunan CAV sistemi ile VAV sisteminin işletme giderleri, Tablo 5'de verilmiştir. İki sistemin işletme maliyetleri arasında yılda 115.802 $ fark hesaplanmıştır. Oysa VAV sistemin uygulanması durumunda CAV sistemine göre ilk yatırım maliyeti sadece 140.000 $ artacaktır. Bu fark VAV sistemi için gerekli olan ama CAV sisteminde kullanılmayan ekstra havalandırma kanalları, anemostat, menfez, panjur, izolasyon, flex kanal, VAV box ve ilave ısıtma serpantini gibi kompenentlerden kaynaklanmaktadır.

Tablo 5. CAV ve VAV Sistemlerinin İşletme Giderleri Karşılaştırması

Bileşen	CAV ($)	VAV ($)
Havalandırma Fanı	138.257	33.356
Soğutma	51.341	42.458
Isıtma	6.921	6.721
Pompa	1.950	133
Soğutma Kulesi Fanı	0	0
TOPLAM	198.469	82.667
Fark	115.802	

Hesaplarda 10 yıllık ömür için Bugünkü Değer Faktörü kullanılmıştır. Bugünkü Değer Faktörü Eşitlik 1 ile hesaplanmıştır. Eşitlikteki BDF değeri Bugünkü Değer Faktörü, i değeri faiz oranı ve n ise yıldır. Para birimi dolar olarak seçildiğinden, hesaplarda faiz oranı olarak Türkiye'de dolara verilen faiz oranı olan yıllık %1,25 değeri kullanılmıştır.

$$BDF = 1/(1+i)^n \quad (1)$$



Şekil 8. Geri ödeme süresi

Tablo 6'da ilk yatırım maliyeti 140.000 $, VAV sistemi için yıllık bakım gideri 11.500 $ değeri alınarak Net Nakit Akışı (NNA), Bugünkü Değer Faktörü (BDF) ve NNA değeri ile BDF değerinin çarpımı verilmiştir. Tablo 6 ve bu tablodaki değerler kullanılarak çizilmiş Şekil 8 incelendiğinde: başta verilen 140.000 $ yatay olarak sabit olduğu, NNA*BDF değerinin ise artış gösterdiği görülmektedir. Bu iki eğrinin kesiştiği noktanın 1-2 sene arasına olduğu görülmektedir. Bu iki eğrinin kesiştiği nokta, harcanan yatırım masrafı ile yapılan tasarrufun eşitlendiği noktayı gösterir. Yani bu işletme için VAV sisteminin seçilmesi başlangıçta daha pahalı gibi gözükse de, aslında bu pahalı sistem kendini çok kısa sürede karşılamakta ve işletme 1,5 yıldan sonra kâra geçmektedir. Bina projesini yapan tasarımcılar tarafından ucuz olduğu düşünülerek CAV sisteminin seçilmesi durumunda, bu bina kullanım ömrü boyunca HVAC sisteminden daha fazla enerji harcayacaktır. Oysa yapılan bir enerji analizi, bu işletme için VAV sisteminin daha uygun olduğunu göstermiştir. Benzer çalışmalar HAP programındaki diğer alternatifler için de geçerlidir.

Her binada VAV sistemi uygundur demek, yanlış bir yaklaşım olur. Binanın kullanım amacına, iklim koşullarına göre sistemlerin karşılaştırılması ve sistemler arasında konfor şartlarından taviz vermeden en ekonomik olanının seçilmesi gerekmektedir. Ancak bu analizlerin yapılması ek bir maliyete neden olmaktadır. Bina tasarım aşamasına geçilmeden bu maliyetlerin de proje bedeline eklenmesi gerekmektedir. Bu sayede binaların kullanım amacı, kullanım şekli, iklim koşullarına göre en ideal HVAC sistemi seçilmiş olacaktır. Başlangıçta proje maliyetinin yükselmesine sebep olan bu analiz, tesisin işletme ömrü boyunca sağlanacak enerji tasarrufu ile fazlasıyla karşılanmış olacaktır.

Tablo 6. CAV ve VAV Sistemlerin 10 Yıllık Ömür İçin Bugünkü Değer Faktörüne Göre İncelenmesi

Yıllar	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Yatırım	-140.000										
Tasarruf		115.802	115.802	115.802	115.802	115.802	115.802	115.802	115.802	115.802	115.802
Bakım		-11.500	-11.500	-11.500	-11.500	-11.500	-11.500	-11.500	-11.500	-11.500	-11.500
NNA	-140.000	104.302	104.302	104.302	104.302	104.302	104.302	104.302	104.302	104.302	104.302
BDF	1	0,988	0,975	0,963	0,952	0,940	0,928	0,917	0,905	0,894	0,883
NNA*BDF	-140.000	103.014	101.743	100.486	99.246	98.021	96.810	95.615	94.435	93.269	92.118

SİMGE LİSTESİ

C	*Soğutma*
H	*Isıtma*
HR	*Isı geri kazanımı*
i	*Faiz oranı*
n	*Yıl*
T	*Termostat*

ALT SİMGE

e	*Elektrik enerjisi*

KISALTMA LİSTESİ

BDF	*Bugünkü Değer Faktörü*
CAV	*Constant Air Volume (Sabit Hava Debisi)*
HAP	*Hourly Analysis Program (Saatlik Analiz Programı)*
HVAC	*Heating-Ventilating-Air Conditioning (Isıtma-Havalandırma ve İklimlendirme)*
NNA	*Net Nakit Akışı*
VAV	*Variable Air Volume (Değişken Hava Debisi)*

KAYNAKLAR

[1] Özcan, U., "Yapıda HVAC Sistem Seçimi", Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1, 212-217, 2019.

[2] Küçükçalı, R., "Çok Katlı Yüksek Konutlarda HVAC Sistemleri Seçimi", Türk Tesisat Mühendisleri Dergisi, 50, 18-22, 2007.

[3] Kim, D., Cox S.J., Cho H., Im P., "Evaluation of Energy Savings Potential of Variable Refrigerant Flow (VRF) From Variable Air Volume (VAV) in the U.S. Climate Locations", Energy Reports, 3, 85–93, 2017.

[4] Okochi, G.S., Yao, Y., "A Review of Recent Developments and Technological Advancements of Variable-Air-Volume (VAV) Air-Conditioning Systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59, 784–817, 2016.

[5] Kanga, S.H., Kimb, H.J., Cho, Y.H., "A Study on the Control Method of Single Duct VAV Terminal Unit Through the Determination of Proper Minimum Air Flow", Energy and Buildings, 69, 464–472, 2014.

[6] Öztürk, H.K., Atalay, Ö., Yılancı, A., "Yapılarda Kullanılan HVAC Sistemlerinde Kontrol ve Enerji Verimliliği", Tesisat Mühendisliği Dergisi, 90, 69-76, 2005.

[7] Aynur, T.N., Hwang, Y., Radermacher, R., "Simulation of a VAV Air Conditioning System in an Existing Building for the Cooling Mode", Energy and Buildings, 41, 922–929, 2009.

[8] Tukur, A., Hallinan K.P., "Statistically Informed Static Pressure Control in Multiple-Zone VAV Systems", Energy and Buildings, 135, 244–252, 2017.

[9] Aktacir, M.A., Büyükalaca, O., Yılmaz, T., "Life-Cycle Cost Analysis for Constant-Air-Volume and Variable-Air-Volume Air-Conditioning Systems", Applied Energy, 83, 606–627, 2006.

[10] Bakry, M.S., Hamdy, M., Mohamed, A., Elsayed, K., "Energy Saving Potential in Open Museum Spaces: A Comparative Hygrothermal Microclimates Analysis", Building and Environment, 225, 109639, 2022.

[11] Yao, Y., Lian, Z., Liu, W., Hou, Z., Wu, M., "Evaluation Program for the Energy-Saving of Variable-Air-Volume Systems", Energy and Buildings, 39, 558–568, 2007.

[12] Fasiuddin, M., Budaiwi, I., "HVAC System Strategies for Energy Conservation in Commercial Buildings in Saudi Arabia", Energy and Buildings, 43, 3457–3466, 2011.

[13] Alghamdi, S.M., Ajour, M.N., Hamdef, N.H.A., Karimipour, A., "Using Proportional-Integral-Derivative Controllers and PCM and a New Design of Building Air Intake With Five Scenarios to Present a Multi-Zone CAV-AHU for Tackling High Energy Consumption", Journal of Building Engineering, 56, 104764, 2022.

[14] Okochi, G. S., Yao, Y., "A Review of Recent Developments and Technological Advancements of Variable-Air-Volume (VAV) Air-Conditioning Systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59, 784-817, 2016.

[15] Wang, S., Jin, X., "Model-Based Optimal Control of VAV Air-Conditioning System Using Genetic Algorithm", Building and Environment, 35, 471-487, 2000.